Über die Wärmeleitung von Gemischen zwischen Wasserstoff und Helium.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät

der

Vereinigten Friedrichs-Universität Halle-Wittenberg

ACAD.
LUGD BAT.
BIBL.

vorgelegt von

Walter Arnold

aus Gr. Salze.

Halle a. S.
Buchdruckerei von Heinrich John
1913.

Referent: Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Dorn.

Meiner lieben Mutter
und dem Andenken meines Vaters.

Inhalts-Angabe.

Seite

1. Einleitung 7
2. Methode und Beschreibung der Apparate 7
3. Maße der Apparate 8
4. Versuchsanordnung 9
5. Theoretisches 11
6. Herstellung der Gase und der Gemische 12
7. Ausführung der Versuche 14
8. Untersuchung der Fehlerquellen 29
9. Vergleichung der Ergebnisse mit der Theorie 35

1. Einleitung.

Die bisherigen Beobachtungen über die Wärmeleitfähigkeit von Gasen beschränkten sich fast nur auf einfache Gase. Gasgemische wurden von Alexandra Wassiljewa[1]) und von Johannes Wachsmuth[2]) untersucht, und zwar waren dies Gemische zwischen Wasserstoff und Sauerstoff und zwischen Argon und Helium. Bei beiden Gemischen hat der eine Bestandteil eine viel größere Leitfähigkeit als der andere. Es bot daher ein gewisses Interesse, Gemische von Gasen zu untersuchen, die die Wärme nahe gleich gut leiten. Auf freundliche Anregung des Herrn Geh. Reg.-Rats Prof. Dr. Dorn unternahm ich es, die Wärmeleitfähigkeit von Gemischen zwischen Wasserstoff und Helium zu untersuchen.

---

2. Methode und Beschreibung der Apparate.

Zu den Versuchen benutzte ich die Methode von Schleiermacher[3]), die im hiesigen Institut schon mehrfach erfolgreich angewendet worden ist. In der Achse eines Glasrohrs ist ein Platindraht ausgespannt, der durch einen elektrischen Strom erwärmt wird. In die Röhre kann das Gas unter beliebigem Drucke eingefüllt werden. Hält man die äußere Wand der Röhre auf einer konstanten Temperatur, so wird die Temperatur des Drahtes stationär. In diesem Zustande wird die gesamte, vom Strom im Drahte erzeugte Wärme durch Leitung und Strahlung fortgeführt. Die Wärmemenge kann aus der Stromstärke und dem Widerstande des Drahtes berechnet werden.

---

[1]) Phys. Zeitschrift. 5, 1904, 737.
[2]) Inaug.-Diss. Halle 1907.
[3]) Wied. Anm. 34, 1888, 623.

Kennt man den Koeffizienten der Widerstandsänderung des Platindrahtes, so läßt sich die Temperatur des Drahtes aus seinem Widerstande finden. Nach Messung der Apparatkonstanten hat man alle Mittel, um die Leitfähigkeit des Gases zu bestimmen. Der Einfluß der Strahlung wird durch besondere Versuche ermittelt. Die Bestimmung der Leitfähigkeit geschah mit zwei Apparaten, die schon früher zu verschiedenen Untersuchungen gedient hatten. Ich beschränke mich darauf, die Beschreibung des Apparates aus der Arbeit des Herrn Schwarze [1]) wiederzugeben.

„In der Achse eines Glasrohres G G' [2]) ist ein dünner Platindraht ausgespannt; an a ist ein dickerer Platindraht, an a' eine Stahl- und darin befindliche Kupferdrahtspirale und an deren Enden ebenfalls ein dickerer Platindraht P' angelötet. Die Stahlfeder ist leicht gespannt und zieht den Draht a a', wenn er durch den galvanischen Strom erwärmt wird und sich ausdehnt, wieder straff, so daß er immer in der Achse der Röhre bleibt.

Sämtliche Lötungen sind mit Feingold ausgeführt. Die noch dünneren Platindrähte e und e' sind an den Enden vorher galvanisch vergoldet, einmal um den Draht a a' herumgeschlungen und dadurch angelötet, daß man den Draht a a' durch einen starken galvanischen Strom zum Glühen brachte. Hierdurch wird die Lötstelle sehr fein und der Draht a a' am wenigsten beschädigt. e und e' sind an den Enden wieder an dickere Platindrähte angelötet.

Die dickeren Platindrähte sind in Glas eingeschmolzen und darüber Röhren angesetzt, die zur Aufnahme von Quecksilber dienen. Die Röhre p führt zur Luftpumpe. Die beiden verwendeten Apparate wurden von Herrn F. O. Götze, Leipzig, hergestellt."

3. Maße der Apparate.

Die Apparatkonstanten konnten nicht noch einmal bestimmt werden, ohne die Apparate zu zerstören. Die folgenden Werte

[1]) W. Schwarze, Inaug.-Diss. Halle 1902. S. 6.
[2]) Fig. 1.

für App. I stammen aus der Arbeit des Herrn Schwarze[1]), die Angaben für App. II erhielt ich von Herrn Krey, der den Apparat vor mir benutzte. Während der Untersuchung des dritten Gemisches zerbrach App. 1 an der in Fig. 1 mit b bezeichneten Stelle, wobei die Elektrode e' vom Platindrahte abriß. Es gelang aber, an den Draht eine neue Elektrode anzulöten. Die Konstanten dieses Apparates, den ich mit Ia bezeichne, erfahren dadurch eine kleine Aenderung. Die Widerstände der Platindrähte bei 0^0 wurden während der Versuche öfters nachgeprüft.

	App. I.	App. Ia.	App. II.
Länge des Platindrahtes	420,2 mm	420,2 mm	472,3 mm
„ zwischen den Elektroden .	340,23 „	336,48 „	365,64 „
Durchmesser des Drahtes	0,4038 „	0,4038 „	0,4014 „
Länge der Elektroden	15,0 „	15,0 u. 31,0 „	43,0 „
Durchmesser der Elektroden . .	0,1 „	0,1 „	0,1 „
Lichter Durchmesser der Röhren	23,710 „	23,710 „	15,663 „
Dicke der Glaswand	0,849 „	0,849 „	0,930 „
Widerstand w_0 bei 0^0 in Ohm . .	0,47454	0,46959	0,56602

4. Versuchsanordnung[2]).

Die beschriebenen Apparate wurden nebeneinander in ein Gefäß aus Weißblech von etwa 15 l Inhalt gehängt, welches das konstante Bad enthielt, geschabtes Eis oder siedendes Wasser. Um Erschütterungen zu vermeiden, stand der Kasten auf einem Tische, der auf einer auf das Kellergewölbe des Instituts aufgemauerten Steinplatte ruhte. Das Ganze war mit einem Abzug aus dichter Leinwand umgeben. Beide Apparate sind durch ein T-Stück mit einem Rohr verbunden, das mit Schaumgold zur Absorption von Quecksilberdämpfen gefüllt war. Eine Kundtsche Glasfeder verband dieses Rohr mit einer Quecksilberluftpumpe nach Töpler-Hagen. Von der Pumpe führte eine zweite Kundtsche

[1]) W. Schwarze, Inaug.-Diss. Halle 1902, S. 7.

[2]) Fig. 3.

Feder zu einem ⊤-förmigen Rohr, das einen Quecksilberverschluss ermöglichte. Das freie Ende dieses Rohres führte weiter zu der Mischpipette M, die einerseits mit den beiden Gaspipetten, andererseits durch ein langes Glasrohr mit einer über das Auslaßrohr der Pumpe gestülpten Bürette zum Auffangen der abgepumpten Gase verbunden war.

Als Stromquelle zur Erwärmung des Platindrahtes diente eine Batterie von 2 Akkumulatoren B[1]). In den Hauptstromkreis ist ferner eingeschaltet eine Wolffsche Widerstandseinheit Ω aus Manganin als Vergleichswiderstand, ein Regulierungswiderstand w und ein Präzisionsamperemeter A von Siemens und Halske. Das Amperemeter wurde mit einem Silbervoltameter geeicht. Es gestattete schätzungsweise eine Ablesung von 0,001 »A«. Die Widerstandseinheit hing in einem Petroleumbade, nach einer Messung der P. T. Reichsanstalt war ihr Wert bei 22,2° C genau 1 »O«. Die Aenderungen des Widerstandes mit der Temperatur wurden bei den Berechnungen berücksichtigt.

Von diesem Hauptstromkreise gingen zwei Abzweigungen aus. Die eine führte von den Elektroden e und e' zu der einen Spule eines Panzerdifferentialgalvanometers nach du Bois-Rubens, das sich auf einer in die Wand eingemauerten Steinplatte befand. Die zweite Abzweigung ging von der Widerstandseinheit aus und führte durch einen Rheostaten Rh zu der zweiten Spule des Galvanometers, so daß die Ströme in entgegengesetzter Richtung durch die Spulen liefen. Rh ist ein Kurbelrheostat aus Manganin, der von Prof. Dr. Dorn entworfen und geprüft worden ist. Seine Einstellung konnte bis 0,1 »O« geschehen, eine weitere Dezimale wurde durch Interpolation aus den Galvanometerausschlägen gewonnen. Die Empfindlichkeit des Galvanometers war 1 Skt. = 10^{-9} »A« bei einem Skalenabstande von ungefähr 2 m. Die Widerstände der Galvanometerrollen betrugen je etwa 1400 »O«. Wegen ihrer Aenderungen mit der Temperatur wurden sie vor und nach jedem Versuche mit Hilfe eines zweiten Panzergalvanometers bestimmt. Die Widerstände w_0 und w_{100} wurden dadurch ermittelt, daß ein Hauptstrom von nur 0,03 »A« benutzt wurde, der gegenüber dem Bade keine merkliche Temperaturerhöhung hervorbrachte. Für die Wärme-

[1]) Fig. 2.

leitungsversuche wurden Ströme von 0,6 bis 1,1 Ampere verwendet.

Im Hauptstromkreise, wie auch in den Abzweigungen befinden sich Kommutatoren, durch die sowohl der Hauptstrom gewendet, wie auch die beiden Galvanometerhälften gewechselt werden konnten. Dadurch werden die entstehenden Thermoströme eliminiert. Zu einem Versuche sind demnach vier Ablesungen nötig, zwei bei kommutiertem Hauptstrom, zwei bei kommutierten Zweigströmen, aus denen die Mittel gebildet wurden.

5. Theoretisches.

Zur Berechnung der Leitfähigkeit und der Widerstände wurden Formeln benutzt, die von den Herren Schwarze[1]) und Günther[2]) mitgeteilt wurden.

Es ist die Wärmeleitfähigkeit

$$k = \frac{0{,}239 \quad i^2 \cdot w_0 \, (1 + \alpha \, t) - S}{t - t'} \cdot \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{2 \, \pi \cdot l}$$

Die einzelnen Zeichen haben hierin folgende Bedeutung:

i = Stromstärke in Ampere.
w_0 = Widerstand des Platindrahtes bei 0^0 in Ohm,
α = Koeffizient der Widerstandsänderung des Platins,
t = Temperatur des Drahtes,
t' = Temperatur des Bades,
r_1 = Radius des Drahtes,
r_2 = Radius der Röhre,
l = Länge des Platindrahtes zwischen den Elektroden,
S = durch Strahlung fortgeführte Wärmemenge.

Die Werte für die Strahlung wurden den Tabellen 1—3 entnommen. t wurde aus den beobachteten Widerständen mittels der Formel

$$w_t = w_0 \cdot (1 + \alpha \, t)$$

berechnet. Der Koeffizient α wurde von Günther aus seinen Beobachtungen zu:

[1]) W. Schwarze, Inaug.-Diss. Halle 1902.
[2]) P. Günther, Inaug.-Diss. Halle 1906.

$$\alpha = 0{,}0020886 - 0{,}0_6 25 \cdot t$$

gefunden.

Die Widerstände der Platindrähte wurden nach folgender von Prof. Dr. Dorn [1]) abgeleiteten Formel berechnet:

$$X = \Omega \sqrt{\frac{(w_1 + X')(w_2 + X')}{(w_1 + \Omega)(w_2 + \Omega)}},$$

worin w_1 und w_2 die Widerstände der Galvanometerrollen, Ω den Widerstand der Einheit, X den Widerstand des Platindrahtes und X' einen Näherungswert für X bedeutet.

---

6. Herstellung der Gase und der Gemische.

Der Wasserstoff wurde durch elektrolytische Zersetzung von verdünnter Schwefelsäure hergestellt. Ueber das Verfahren nähere Angaben zu machen, erscheint nicht nötig, es findet sich genau in einer Arbeit des Herrn Völker [2]) beschrieben. Der Wasserstoff wurde spektralanalytisch geprüft, er erwies sich als vollkommen rein. Der bei der Zersetzung entstehende Sauerstoff wurde ebenfalls aufgefangen und er diente bei den Analysen der Gemische als Oxydationsmittel des Wasserstoffs. Das verwendete Helium wurde durch Reinigung von vorhandenem Rohmaterial gewonnen. Die Reinigung geschah nach dem neuen Verfahren von Gehlhoff [3]).

In einer Zelle Z [4]) von etwa 200 ccm Inhalt sind oben und unten zwei Platindrähte eingeschmolzen, die als Elektroden für einen Induktionsstrom dienen. In der Zelle befindet sich metallisches Kalium, das sich um die untere Elektrode lagert. Von der Rohhelium-Pipette S_3 führte ein durch zwei Hähne 1 und 2 abschliessbares Rohr zu der Kaliumzelle. Von hier aus ging ein zweites Rohr zu einer Quecksilberhahnluftpumpe P, durch die das gereinigte Gas in eine zweite Pipette S_2 gepumpt werden

[1]) P. Günther, Inaug.-Diss. Halle 1906.

[2]) E. Völker. Inaug.-Diss. Halle 1910.

[3]) G. Gehlhoff, Berichte der deutschen physikalischen Gesellschaft 1911, S. 271.

[4]) Fig. 4.

konnte. Das ganze System wurde mit einer Töplerpumpe evakuiert und die Zelle Z mittels eines elektrischen Ofens auf etwa 180° C erwärmt. Dann wurde, nachdem Hahn 3 geschlossen worden war, durch aufeinanderfolgendes Oeffnen und Schließen von Hahn 1 und 2 etwa 4 ccm Rohhelium, das besonders mit Stickstoff verunreinigt war, in die Zelle hineingelassen, durch die jetzt ein Induktionsstrom geleitet wurde, so daß das nun mehr geschmolzene Kalium die Kathode bildete. Das anfänglich violette Licht ging allmählich in gelb über, ein Zeichen dafür, daß der Stickstoff absorbiert wurde. Schon nach 5 Minuten war der Stickstoff in der Zelle verschwunden. Der Strom wurde noch weitere 5 Minuten durch die Zelle geschickt, um das in den angrenzenden Röhren befindliche Gas zu reinigen. Jetzt wurde das gereinigte Gas mittels der Pumpe P abgepumpt. Bevor es jedoch in die Pipette S_2 gebracht wurde, wurde es mittels der Plückerröhre Pl spektralanalytisch auf seine Reinheit geprüft. Damit die heißen Gase aus dem Fett des Hahnes 3 keine Kohlenwasserstoffe entwickelten, war zwischen diesem Hahn und der Zelle eine Glasrohrschlange K eingeschaltet, die durch ein Gemisch von Alkohol und fester Kohlensäure gekühlt wurde.

Zur Herstellung der Gemische selbst wurde folgendermaßen verfahren. Das System[1]) wurde vollkommen evakuiert und, um die Dichtigkeit des Apparates zu prüfen, 24 Stunden stehen gelassen. Darauf wurden sämtliche Hähne bis auf Hahn 2 geschlossen und ein Teil Helium in die Pipette M geleitet. Jetzt wurde nach Oeffnung von Hahn 1 das Gas in die Pumpe und von hier in die Bürette P gebracht. Nachdem wieder Vakuum im System herrschte, wurde auf gleiche Weise Wasserstoff und zwar etwa der vierte Teil von der Menge Helium in die Pipette M gelassen und darauf ebenfalls in die Bürette P gepumpt. Hier blieb das Gemisch bis zum nächsten Tage, worauf zur Analyse geschritten wurde. Eine zweite Analyse wurde nach Beendigung der Wärmeleitungsversuche des Gemisches ausgeführt. Diese Analysen wurden mit dem Hempelschen Apparate genau nach Hempels Anleitung[2]) vorgenommen. Die andern Ge-

[1]) Fig. 3.

[2]) W. Hempel, Gasanalytische Methoden, 3. Auflage. Braunschweig 1900.

mische wurden dadurch hergestellt, dass zu dem vorhandenen Gemische eine entsprechende Menge Wasserstoff hinzugefügt wurde. Die vier untersuchten Gemische hatten folgende Zusammensetzung (in Volumenprozenten). (Für das dritte Gemisch konnte eine zweite Analyse nicht ausgeführt werden, da der Apparat I vorher zerbrach und das Gasgemisch entwich.)

Gemisch	% H_2		Mittel	
	1. Anal.	2. Anal.	% H_2	% He
1	22,26	22,10	22,18	77,82
2	41,31	41,19	41,25	58,75
3	60,24	—	60,24	39,76
4	79,51	79,69	79,60	20,40

7. Ausführung der Versuche.

Vor der Bestimmung der Leitfähigkeit der Gemische wurde die Größe der Strahlung festgestellt. Dies geschah genau ebenso, wie es in der Arbeit von Schwarze angegeben ist. Die gefundenen Werte stimmen mit den von Herrn Schwarze gefundenen Werten für App. I und den mir von Herrn Krey mitgeteilten für App. II überein. Die folgenden Tabellen 1—3 enthalten die Werte der Strahlung für App. I und II und den durch Aenderung von I entstandenen App. Ia. Diese Werte wurden in ein Koordinatensystem eingetragen. Aus den so erhaltenen Kurven wurden die Werte für S in den Tab. 4—19 entnommen.

Tab 1. Strahlung für App. I.

Bad: Schmelzendes Eis		Bad: Siedendes Wasser	
$t - t'$	S in $\frac{\text{gr. cal}}{\text{sec}}$	$t - t'$	S in $\frac{\text{gr. cal}}{\text{sec}}$
4,69	0,0002814	3,77	0,0004925
8,66	5591	5,89	8778
11,70	7346	9,20	13758
16,10	9410	13,25	19911

Tab. 2. Strahlung für App. II.

Bad: Schmelzendes Eis		Bad: Siedendes Wasser	
$t - t'$	S in $\frac{\text{gr. cal}}{\text{sec}}$	$t - t'$	S in $\frac{\text{gr. cal.}}{\text{sec}}$
5,70	0,0003406	2,63	0,0004093
8,34	4952	6,51	10521
10,40	6751	10,61	16525
17,80	11514	15,62	24056

Tab. 3. Strahlung für App. Ia.

Bad: Schmelzendes Eis		Bad: Siedendes Wasser	
$t - t'$	S in $\frac{\text{gr. cal.}}{\text{sec}}$	$t - t'$	S in $\frac{\text{gr. cal.}}{\text{sec}}$
4.21	0,0002403	5,19	0,0008152
6.53	3841	7.42	11079
9,70	5869	9.47	13566
14.11	8937		

Die folgenden Tabellen 4—19 enthalten die Beobachtungen an den 4 Gemischen. In ihnen bedeutet:

p den Druck des Gases in mm Hg,

t die Temperatur des Drahtes,

t' die des Bades,

Q die gesamte durch Leitung und Strahlung überführte Wärmemenge in $\frac{\text{gr. cal}}{\text{sec}}$

S die nur durch Strahlung und

L die nur durch Leitung übergeführte Wärmemenge.

Außer den Gasgemischen wurden noch die reinen Gase Wasserstoff und Helium einigen Beobachtungen unterzogen, die mit den von Herrn Schwarze[1]) und Herrn Günther[2]) gefundenen Werten gute Uebereinstimmung zeigen.

[1]) W. Schwarze, Ann. d. Physik. **11**, 1903, S. 303.

[2]) P. Günther, Inaug.-Diss. Halle 1906.

Tab. 4.

77,82% He Gemisch 1. Apparat I. 22,18% H_2

Bad: Schmelzendes Eis					
p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
69,0	6,46	0,11128	0,00039	0,11089	0,017166
—	8,24	0,14046	51	0,13995	0,017018
64,5	6,56	0 11608	39	0,11569	0,017636
—	7,81	0,13908	48	0,13860	0,017746
54,0	6,20	0,10968	37	0,10931	0,017630
—	7,49	0,13279	46	0,13233	0,017672
42 5	6,28	0,11079	38	0,11041	0,017581
—	7,67	0,13557	47	0,13510	0,017614
27,5	4,93	0,08562	29	0,08533	0,017308
—	6,29	0,10878	38	0,10840	0,017234
16,4	5,09	0,08545	31	0,08513	0,016735
—	6,58	0,11131	39	0,11092	0,016818
10,5	6,61	0,10818	40	0,10778	0,016306
—	4,01	0,06517	24	0,06493	0,016192
—	5,26	0,08528	32	0,08496	0,016152
6,1	4,22	0,06468	25	0,06443	0,015268

Tab. 5.

77,82% He Gemisch 1. Apparat I. 22,18 % H_2

Bad: Siedendes Wasser					
p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
69,9	4,98	0,10807	0,00079	0,10728	0,021542
—	6,32	0,13925	98	0,13827	0,021879
—	7,56	0,16800	117	0,16683	0,022068
54,8	5,24	0,11053	82	0,10971	0,020937
—	6,45	0,13703	100	0,13603	0,021090
43,0	5,14	0,11119	81	0,11038	0,021475
—	6,53	0,14033	102	0,13931	0,021334
—	8,43	0,18014	130	0,17884	0,021215
27,4	1,91	0,03971	32	0,03939	0,020623
—	2,57	0,05885	43	0,05842	0,022732
—	4,59	0,10188	73	0,10115	0,022037
14,0	5,18	0,10306	82	0,10224	0,019737
—	6,58	0,13301	103	0,13198	0,020059
9,6	5,45	0,10380	86	0,10294	0,018888

Tab. 6.

77,82 % He Gemisch 1. Apparat II. 22,18 % H_2

Bad: Schmelzendes Eis

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
69,0	6,49	0,13586	0,00037	0,13549	0,020877
—	7,96	0,16715	46	0,16669	0,020941
64,5	6,71	0,14034	38	0,13996	0,020859
—	8,07	0,16932	47	0,16885	0,020923
54,0	6,12	0,12676	35	0,12641	0,020861
	7,57	0,14214	44	0,14170	0,020870
42,5	6,75	0,14069	39	0,14030	0,020786
—	8,34	0,17388	48	0,17340	0,020791
27,5	5,11	0,10452	29	0,10423	0,020791
—	6,60	0,13452	38	0,13414	0,020325
16.4	5,20	0,10288	30	0,10258	0,019727
—	6,64	0,13130	38	0,13092	0,019717
10,5	6,66	0,12783	38	0,12745	0,019137
—	5,41	0,10269	31	0,10238	0,018924
—	4,18	0,08014	24	0,07990	0,019115
6,1	4,50	0,08019	25	0,07994	0,017764

Tab. 7.

77,82 % He Gemisch 1. Apparat II. 22,18 % H_2

Bad: Siedendes Wasser

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
69,9	6,20	0,16114	0,00105	0,16009	0,025820
—	8,08	0,21108	135	0,20973	0,025957
54,8	5,22	0,13221	88	0,13133	0,025159
—	6,62	0,16871	111	0,16760	0,025317
—	7,35	0,19134	123	0,19011	0,025865
43,0	5,17	0,12978	89	0,12889	0,024931
—	6,67	0,16410	112	0,16298	0,024435
27,4	3,72	0,09326	66	0,09260	0,024893
—	2,73	0,06938	50	0,06888	0,025230
—	4,83	0,12616	84	0,12532	0,025946
14,0	5,25	0,12064	90	0,11974	0,022760
—	6,75	0,15374	113	0,15261	0,022609
9,6	5,70	0,12048	97	0,11951	0,020967

Tab. 8.

58,75 % He Gemisch 2. Apparat I. 41,25 % H_2

Bad: Schmelzendes Eis.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
60,5	3,02	0,05467	0,00018	0,05449	0,018043
—	4,12	0,07352	24	0,07328	0,017786
—	5,26	0,09375	32	0,09343	0,017762
52,8	5,19	0,09292	31	0,09261	0,017844
—	6,30	0,11374	38	0,11336	0,017994
42,6	5,27	0,09334	32	0,09302	0,017651
—	4,22	0,07427	25	0,07402	0,017538
32,6	5,10	0,09086	31	0,09055	0,017755
24,4	5,14	0,09168	31	0,09137	0,017776
—	6,59	0,11380	40	0,11340	0,017210
—	4,29	0,07373	25	0,07348	0,017128
—	5,59	0,09516	34	0,09482	0,016963
22,2	4,69	0,08206	28	0,08178	0,017437
—	5,30	0,09232	32	0,09200	0,017358
18,6	4,82	0,08305	29	0,08276	0,017170
—	5,56	0,09589	34	0,09555	0,017180
13,3	5,00	0,08152	30	0,08122	0,016244
—	5,86	0,09826	35	0,09791	0,016708

Tab. 9.

58,75 % He Gemisch 2. Apparat I. 41,25 % H_2

Bad: Siedendes Wasser.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
69,3	3,23	0,06640	0,00052	0,06588	0,020396
—	4,12	0,08754	66	0,08688	0,021087
—	5,14	0,11248	81	0,11167	0,021726
60,5	3,12	0,06566	48	0,06518	0,021583
—	3,93	0,08604	61	0,08543	0,021738
48,3	2,91	0,06714	47	0,06667	0,022910
—	3,60	0,08644	58	0,08586	0,023850
—	4,71	0,11047	75	0,10972	0,023295
34,7	3,97	0,08570	63	0,08507	0,021429
—	5,05	0,11013	80	0,10933	0,021650
25,6	5,11	0,10989	88	0,10901	0,021333
—	4,01	0,08723	64	0,08659	0,021594
—	4,65	0,09989	72	0,09917	0,021330
14,4	4,91	0,10058	78	0,09980	0,020326
—	5,70	0,11758	89	0,11669	0,020472

Tab. 10.

58,75 % He Gemisch 2. Apparat II. 41,25 % H_2

Bad: Schmelzendes Eis.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
60,5	4,08	0,08630	0,00023	0,08607	0,021095
—	5,39	0,11264	31	0,11233	0,020844
—	6,67	0,13948	38	0,13910	0,020855
52,8	4,13	0,08696	24	0,08672	0,020998
—	5,37	0,11483	31	0,11452	0,021375
42,6	5,48	0,11339	31	0,11308	0,020635
—	4,26	0,08808	25	0,08783	0,020617
32,6	4,36	0,08821	25	0,08795	0,020172
—	5,33	0,11040	30	0,11010	0,020657
24,4	5,51	0,11212	31	0,11181	0,020292
—	4,21	0,08676	24	0,08652	0,020532
—	5,50	0,11278	31	0,11247	0,020450
22,2	5,11	0,10429	29	0,10400	0,020352
—	5,97	0,12215	34	0,12181	0,020404
18,6	4,89	0,09859	27	0,09832	0,020106
—	5,96	0,12088	34	0,12054	0,020225
13,3	4,99	0,09791	28	0,09763	0,019565
—	6,27	0,12366	36	0,12330	0,019665

Tab. 11.

58,75 % He Gemisch 2. Apparat II. 41,25 % H_2

Bad: Siedendes Wasser.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
69,3	4,16	0,10521	0,00073	0,10448	0,025115
—	3,16	0,08018	57	0,07961	0,025193
—	5,27	0,13698	90	0,13608	0,025822
60,5	4,13	0,10895	72	0,10823	0,026206
48,3	3,09	0,08089	56	0,08033	0,025997
—	4,05	0,10794	71	0,10723	0,026476
—	5,09	0,13370	88	0,13282	0,026094
34,7	5,12	0,13263	88	0,13175	0,025733
—	4,19	0,10506	72	0,10434	0,024905
25,6	4,21	0,10640	74	0,10566	0,025098
—	5,26	0,13385	90	0,13295	0,025275
—	4,50	0,11592	79	0,11513	0,025585
14,4	5,88	0,14240	100	0,14140	0,024047
—	4,88	0,11873	85	0,11788	0,024155

Tab. 12.

39,76 % He Gemisch 3. Apparat I. 60,24 % H_2

Bad: Schmelzendes Eis.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t - t'}$
85,4	4,03	0,07645	0,00024	0,07621	0,018910
—	5,20	0,09630	31	0,09599	0,018460
74,4	3,83	0,07202	23	0,07179	0,018744
—	5,04	0,09433	30	0,09403	0,018657
65,0	6,07	0,11435	37	0,11398	0,018777
—	5,06	0,09433	30	0,09403	0,018583
—	4,03	0,07571	24	0,07547	0,018727
—	3,42	0,06423	20	0,06403	0,018722
56,0	4,83	0,09182	29	0,09153	0,018950
—	5,99	0,11342	36	0,11306	0,018875
43,0	4,92	0 09224	29	0,09195	0,018689
—	6,05	0,11367	37	0,11330	0,018727
36,3	5,16	0,09601	31	0,09570	0,018547
—	4,51	0,08319	27	0,08292	0,018386

Tab. 13.

39,76 % He Gemisch 3. Apparat I. 60,24 % H_2

Bad: Siedendes Wasser.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t - t'}$
96,3	2,80	0,06908	0,00025	0,06883	0,024582
—	3,54	0,08763	52	0,08710	0,024605
—	5,83	0,13985	86	0,13899	0,023840
—	4,80	0,11459	70	0,11371	0,023699
—	3,64	0,09007	53	0,08954	0,024599
85,6	3,31	0,08693	47	0,08646	0,024121
—	4,45	0,11477	64	0,11413	0,024647
74,6	3,02	0,07717	44	0,07673	0,024408
—	3,99	0,10085	58	0,10027	0,024131
64,3	4,01	0,10394	59	0,10335	0,024774
46,7	3,27	0,08602	46	0,08556	0,024665
—	3,98	0,10293	58	0,10235	0,024716
38,5	4,03	0,10294	58	0,10236	0,024400

Tab. 14.

39,76 % He Gemisch 3. Apparat II. 60,24 % H_2

Bad: Schmelzendes Eis

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
85,4	3,97	0,08824	0,00023	0,08801	0,022168
—	4,73	0,11001	26	0,10975	0,023203
—	5,82	0,13133	33	0,13100	0,022509
74,4	4,41	0,09802	25	0,09777	0,022170
—	4,91	0,10931	28	0,10903	0,022206
65,0	4,92	0,10907	28	0,10879	0,022112
—	3,99	0,08890	23	0,08867	0,022224
—	6,02	0,13436	34	0,13402	0,022262
56,0	5,07	0,11181	29	0,11152	0,021996
—	6,10	0,13465	35	0,13430	0,022017
43,0	4,84	0,10615	27	0,10588	0,021876
—	6,11	0,13411	35	0,13376	0,021892
36,3	5,10	0,11157	29	0,11128	0,021820

Tab. 15.

39,76 % He Gemisch 3. Apparat II. 60,24 % H_2

Bad: Siedendes Wasser.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
96,3	2,95	0,08780	0,00044	0,08736	0,029613
—	3,55	0,10420	55	0,10365	0,029197
—	4,44	0,13017	70	0,12947	0,029160
—	5,62	0,16274	88	0,16186	0,028801
—	4,97	0,14197	78	0,14119	0,028408
85,6	3,04	0,08853	47	0,08806	0,028967
—	4,17	0,12148	65	0,12083	0,028969
—	4,59	0,13227	71	0,13156	0,028663
74,6	3,33	0,09521	52	0,09469	0,028435
—	4,24	0,12178	66	0,12112	0,028565
64,3	4,19	0,12036	66	0,11970	0,028568
46,7	3,52	0,10157	54	0,10103	0,028702
—	4,21	0,12173	65	0,12108	0,028760
38,5	4,13	0,11806	64	0,11742	0,028431

Tab. 16.

20,40 % He Gemisch 4. Apparat Ia. 79,60 % H_2

Bad: Schmelzendes Eis.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
82,6	3,70	0,07292	0,00022	0,07270	0,019596
—	4,80	0,09427	29	0,09398	0,019539
70,8	5 56	0,11015	34	0,10981	0,019714
—	4,53	0,08853	27	0,08826	0,019440
56,6	4,84	0,09491	29	0,09462	0,019509
—	5,91	0,11589	36	0,11553	0,019515
46,8	4,98	0,09369	30	0,09339	0,018715
—	5,93	0,11567	36	0,11531	0,019413
34,5	4,49	0,08692	27	0,08665	0,019256
—	5,56	0,10617	34	0,10583	0,019034
25,0	5,60	0,10772	34	0,10738	0,019175
—	4,28	0,0 220	26	0,08194	0,019145
20,5	4,31	0,08182	26	0,08156	0,018923
—	4,57	0,10595	34	0,10561	0,018960
16,4	4,69	0,09302	28	0,09274	0,019774
12,6	5,00	0,09267	30	0,09237	0,018474
9,3	4,33	0,07558	26	0,07532	0,017395

Tab. 17.

20,40 % He Gemisch 4. Apparat Ia. 79,60 % H_2

Bad: Siedendes Wasser.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
96,2	2,66	0,06838	0,00042	0,06796	0,025549
—	3,48	0,08803	53	0,08750	0,025144
—	4,45	0,11272	67	0,11205	0,025180
81,3	3,94	0,09941	58	0,09883	0,025089
—	4,90	0,12350	73	0,12277	0,025054
65,2	3,70	0,09312	55	0,09257	0,025019
—	4,70	0,11814	70	0,11744	0,024988
54,0	3,55	0,08931	53	0,08878	0,025008
—	4,32	0,10853	65	0,10788	0,024916
36,5	3,46	0,08807	53	0,08754	0,025300
25,5	3,04	0,07679	46	0,07633	0,025109
—	4,11	0,10238	61	0,10177	0,024762
21,9	3,80	0,09273	57	0,09216	0,024253
13,7	4,20	0,10218	63	0,10155	0,024178
—	2,98	0,07216	45	0,07171	0,024063

Tab. 18.

20,40 % He Gemisch 4. Apparat II. 79,60 % H_2

Bad: Schmelzendes Eis.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
82,6	3,46	0,09169	0,00020	0,09149	0,026366
—	4,42	0,10512	25	0,10487	0,023726
—	5,55	0,13119	32	0,13087	0,023581
70,8	5,23	0,12398	30	0,12368	0,023648
56,6	4,58	0,10772	26	0,10746	0,023462
—	5,71	0,13452	32	0,13420	0,023502
46,8	5,74	0,13507	33	0,13474	0,023451
—	4,70	0,11010	27	0,10983	0,023367
34,5	4,10	0,09429	23	0,09406	0,022885
—	5,23	0,12170	30	0,12140	0,023213
25,0	4,20	0,09636	24	0,09614	0,022890
—	5,40	0,12397	31	0,12366	0,022900
20,5	5,25	0,11932	30	0,11902	0,022670
—	4,29	0,09731	25	0,09706	0,022626
16,4	4,40	0,10081	25	0,10056	0,023334
12,6	4,85	0,10604	27	0,10577	0,021809
9,3	4,66	0,09842	26	0,09816	0,021064

Tab. 19.

20,40 % He Gemisch 4. Apparat II. 79,60 % H_2

Bad: Siedendes Wasser.

p	t — t'	Q	S	L	$\frac{L}{t-t'}$
96,2	2,21	0,07104	0,00035	0,07069	0,031987
—	3,29	0,10263	52	0,10211	0,031038
—	2,30	0,07215	36	0,07179	0,031213
81,3	3,26	0,09994	51	0,09943	0,030501
—	2,62	0,08039	40	0,07999	0,030530
65,2	4,38	0,13199	70	0,13129	0,029975
—	3,40	0,10359	54	0,10305	0,030309
54,0	3,30	0,10089	52	0,10037	0,030415
—	3,99	0,12037	63	0,11974	0,030009
36,5	2,19	0,06599	34	0,06565	0,029980
25,5	3,76	0,11289	59	0,11230	0,029866
—	3,03	0,09311	47	0,09264	0,030574
21,9	3,61	0,10577	57	0,10520	0,029142
13,7	3,24	0,09142	52	0,09090	0,028055
—	4,35	0,11904	69	0,11835	0,027217
9,7	3,11	0,08379	49	0,08330	0,026784

Nach Schleiermacher[1]) gelten die Werte $\frac{L}{t-t'}$ für die Temperatur $t' + \frac{t-t'}{2}$. Aus den Werten für $t' = 0^0$ und $t' = 100^0$ habe ich mittels der Beziehung

$$k_t = k_0 \ (1 + \gamma\, t)$$

den Temperaturkoeffizienten γ berechnet. Für die einzelnen Gemische fand ich folgende Werte, zu denen ich noch die für Helium[2]) und Wasserstoff[3]) hinzufüge.

Gas	γ
Helium	0,00318
Gemisch 1	0,00243
„ 2	0,00242
„ 3	0,00287
„ 4	0,00285
Wasserstoff	0,00281

Die Abweichung zwischen den Werten für Helium und den beiden ersten Gemischen wird auf Beobachtungsfehler bei 100^0 zurückzuführen sein. Die folgenden Tabellen enthalten die Werte für $\frac{L}{t-t'}$, auf 0^0 und 100^0 mittels des Temperaturkoeffizienten umgerechnet.

Tab. 20.

77,82 % He Gemisch 1. Apparat II. 22,18 % H_2

p	$\frac{L_0}{t-t'}$	p	$\frac{L_{100}}{t-t'}$
69,0	0,017036	69,9	0,021463
—	0,016849	—	0,021770
64,5	0,017495	—	0,021930
—	0,017579	54,8	0,020863
54,0	0,017498	—	0,020991

[1]) Schleiermacher, Wied. Ann. **34**, 1888, S. 632.
[2]) Entnommen W. Schwarze, Ann. d. Phys. **11**, 1903, S. 327.
[3]) Entnommen P. Günther, Inaug.-Diss. Halle 1906.

Tab. 20 (Fortsetzung)

p	$\frac{L_0}{t-t'}$	p	$\frac{L_{100}}{t-t'}$
54,0	0,017513	43,0	0,021393
42,5	0,017448	—	0,021228
—	0,017451	—	0,021061
27,5	0,017205	27,4	0,020584
—	0,017103	—	0,022675
16,4	0,016622	—	0,021933
—	0,016696	14,0	0,019665
10,5	0,016176	—	0,019958
—	0,016114	9,6	0,018813
—	0,016049	—	—
6,1	0,015190	—	—

Tab. 21.

77,82 % He Gemisch 1. Apparat II. 22,18 % H_2

p	$\frac{L_0}{t-t'}$	p	$\frac{L_{100}}{t-t'}$
69,0	0,020713	69,9	0,025095
—	0,021213	—	0,025768
64,5	0,020690	54,8	0,025022
—	0,020720	—	0,025187
54,0	0,020707	—	0,025135
—	0,020680	43,0	0,024835
42,5	0,020616	—	0,024300
—	0,020582	27,4	0,024803
27,5	0,020271	—	0,025163
—	0,020163	—	0,025823
16,4	0,019603	14,0	0,022680
—	0,019559	—	0,022506
10,5	0,018983	9,6	0,020883
—	0,018800		
—	0,019018		
6,1	0,017668		

Tab. 22.

58,75 % He Gemisch 2. Apparat I. 41,25 % H_2

p	$\frac{L_0}{t - t'}$	p	$\frac{L_{100}}{t - t'}$
60,5	0,017978	69,3	0,020359
—	0,017698	—	0,021035
—	0,017650	—	0,021651
52,8	0,017732	60,5	0,021551
—	0,017858	—	0,021685
42,6	0,017539	48,3	0,022845
—	0,017449	—	0,023794
32,6	0,017646	—	0,023233
24,4	0,017666	34,7	0,021350
—	0,017071	—	0,021549
—	0,017040	25,6	0,021231
—	0,016848	—	0,021514
22,2	0,017339	—	0,021242
—	0,017248	14,4	0,020240
18,6	0,017070		0,020370
—	0,017065		
13,3	0,016147		
—	0,016590		

Tab. 23.

58,75 % He Gemisch 2. Apparat II. 41,25 % H_2

p	$\frac{L_0}{t - t'}$	p	$\frac{L_{100}}{t - t'}$
60,5	0,020992	69,3	0,025052
—	0,020710	—	0,025155
—	0,020687	—	0,025690
52,8	0,020893	60,5	0,026132
—	0,021188	48,3	0,025948
42,6	0,020500	—	0,026414
—	0,020511	—	0,025995
32,6	0,020066	34,7	0,025610
—	0,020524	—	0,024813
24,4	0,020172	25,6	0,025001
—	0,020428	—	0,025151
—	0,020334	—	0,025478
22,2	0,020227	14,4	0,023924
—	0,020258		0,024054
18,6	0,019988		
—	0,020081		
13,3	0,019447		
—	0,019517		

Tab. 24.

39,76 % He Gemisch 3. Apparat I. 40,24 % H_2

p	$\frac{L_0}{t - t'}$	p	$\frac{L_{100}}{t - t'}$
85,4	0,018801	96,3	0,024500
—	0,018323	—	0,024502
74,4	0,018641	—	0,023680
—	0,018523	—	0,023566
65,0	0,018614	—	0,024494
—	0,018449	85,6	0,024033
—	0,018619	—	0,024520
—	0,018631	74,6	0,024432
56,0	0,018820	—	0,024017
—	0,018714	64,3	0.024657
43,1	0,018558	46,7	0,024586
—	0,018566	—	0,024613
36,3	0,018411	38,5	0,024296
—	0,018268		

Tab. 25.

39,76 % He Gemisch 3. Apparat II. 60,24 % H_2

p	$\frac{L_0}{t - t'}$	p	$\frac{L_{100}}{t - t'}$
85,4	0,022043	96,3	0,029510
—	0,023047	—	0,029077
—	0,022323	—	0,029011
74,4	0,022031	—	0,028614
—	0,022051	-	0,028379
65.0	0,021957	85,6	0,028863
—	0,022097	—	0,028831
—	0,022072	—	0,028513
56,0	0,021837	74,6	0,028258
—	0,021826	—	0,028424
43,1	0,021727	64,3	0,028428
—	0,021702	46,7	0,028595
36,3	0,021662	—	0,028633
		38,5	0,028308

Tab. 26.

20,40 % He Gemisch 4. Apparat Ia. 79,60 % H_2

p	$\frac{L_0}{t - t'}$	p	$\frac{L_{100}}{t - t'}$
82,6	0,019494	96,2	0,025474
—	0,019406	—	0,025048
70,8	0,019560	—	0,025056
—	0,019315	81,3	0,024980
56,6	0,019376	—	0,024918
—	0,019352	65,2	0,024916
46,8	0,019282	—	0,024858
—	0,019251	54,0	0,024911
34,5	0,019120	—	0,024798
—	0,019103	36,5	0,025204
25,0	0,019023	25,5	0,025025
—	0,019028	—	0,024654
20,5	0,018806	21,9	0,024172
—	0,018810	13,7	0,024082
16,4	0,019643		0,024000
12,6	0,018343		
9,3	0,017289		

Tab. 27.

20,40 % He Gemisch 4. Apparat II. 79,60 % H_2

p	$\frac{L_0}{t - t'}$	p	$\frac{L_{100}}{t - t'}$
82,6	0,025997	96,2	0,031909
—	0,023578	—	0,030946
—	0,023396	—	0,031144
70,8	0,023473	81,3	0,030392
56,6	0,023310	—	0,030443
—	0,023313	65,2	0,029838
46,8	0,023251	—	0,030197
—	0,023212	54,0	0,030305
34,5	0,022752	—	0,029877
—	0,023042	36,5	0,029907
25,0	0,022754	25,5	0,029742
—	0,022726	—	0,030476
20,5	0,022503	21,9	0,029034
—	0,022489	13,7	0,027978
16,4	0,023189	—	0,027104
12,6	0,021660	9,7	0,026721
9,3	0,020925	—	—

8. Untersuchung der Fehlerquellen.

Aus diesen für $\frac{L}{t - t'}$ gefundenen Werten lassen sich nun vermöge der Beziehung:

$$k = \frac{L}{t - t'} \cdot \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\,\pi \cdot l}$$

die Koeffizienten der Wärmeleitung berechnen. Hier sind aber mehrere Fehlerquellen zu berücksichtigen, von denen die durch den Temperatursprung an der Wand entstehende am größten ist

Prallt ein aus einer wärmeren Schicht kommendes Molekül gegen eine kältere Wand, so behält es eine größere Geschwindigkeit, als der Temperatur der Wand entspricht, umgekehrt bleibt die Geschwindigkeit des Moleküls kleiner, wenn es aus einer kälteren Schicht kommend gegen eine wärmere Wand stößt. Zwischen der Wand und der Schicht, die der Wand unmittelbar anliegt, entsteht ein Sprung im Temperaturabfall. Fände der Temperaturabfall in der das Gas begrenzenden Materie nach demselben Gesetze statt wie im Gase selbst, so würde die Stelle der Grenzmaterie die Temperatur der Wand erhalten, die sich eine gewisse Strecke λ hinter der Wand befände. Diese Strecke λ ist proportional der mittleren Weglänge des Moleküls, also umgekehrt proportional dem Drucke des Gases. Der Proportionalitätsfaktor ist von der Natur des Gases abhängig und muß durch Versuche ermittelt werden. Nach den Untersuchungen des Herrn v. Smoluchowski[1]) ist bei radialer Leitung zwischen Zylinderwänden:

$$\lambda = \frac{\ln \frac{R}{r}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r}} \left(\frac{L_0}{\bar{L}} - 1\right).$$

Hierin bedeuten R und r die Zylinderradien, L_0 die für 1^0 Temperaturunterschied in der Sekunde übergeleitete Wärmemenge bei hohem Drucke, bei dem der Temperatursprung keinen merklichen Einfluß hat, $\bar{L}$ die Wärmemenge bei dem betreffenden niederen Drucke. Um die wahre Wärmeleitfähigkeit für solche Drucke

[1]) v. Smoluchowski, Wied. Annalen 64, 1898, 101.

zu finden, bei denen der Temperatursprung von Einfluß ist, haben wir den Radius des äußern Zylinders um λ zu vergrößern, den Radius des innern um dieselbe Strecke zu verkleinern. Gerade bei der Schleiermacherschen Methode, bei der ein dünner Draht erwärmt wird, macht sich der Temperatursprung stark geltend, da die Verkleinerung des Drahthalbmessers um eine, wenn auch kleine Strecke von ziemlich bedeutendem Einflusse ist. Zur Berechnung des Temperatursprungskoeffizienten λ nahm ich für L_0 die Werte für $\frac{L_0}{t - t'}$ für höhere Drucke, für L die Werte unter 25 mm. Mit dem hieraus erhaltenen λ korrigierte ich die Werte für $\frac{L_0}{t - t'}$ für höhere Drucke und berechnete λ wieder unter Zuhilfenahme der korrigierten Werte. Es ergaben sich schließlich für die einzelnen Gemische folgende Temperatursprungskoeffizienten, zu denen ich noch die für Helium und Wasserstoff hinzufüge.

Gas	% He	% H_2	λ
Helium	100,00	0,00	$0{,}001601 \cdot \frac{760}{p}$ mm
Gemisch 1	77,82	22,18	0,001275 „
„ 2	58,75	41,25	0,001256 „
„ 3	39,76	60,24	(0,001269 „)
„ 4	20,40	79,60	0,001281 „
Wasserstoff	0,00	100,00	0,001290 „

Den Wert für Helium berechnete ich aus den Beobachtungen von Schwarze [1]), der Wert für Wasserstoff stammt aus der Arbeit von Smoluchowski [2]), mit dem der von mir aus Günthers [3]) Beobachtungen berechnete Wert ungefähr übereinstimmt. Für das dritte Gemisch konnte der Temperatursprungskoeffizient nicht berechnet werden, da der Apparat zerbrach, ehe ich zu genügend tiefen Drucken gekommen war. Der für das dritte Gemisch angegebene Wert ist durch Interpolation aus den für Gemisch 2 und 4 gefundenen Werten genommen worden.

[1]) W. Schwarze, Ann. d. Phys. 11, 1903, S. 303.
[2]) v. Smoluchowski, Wied. Ann. 64, 1898, S. 129.
[3]) P. Günther, Inaug.-Diss. Halle 1906.

Die mittlere Weglänge beträgt bei 0° nach Untersuchungen von Schultze[1]) und Markowski[2])

$$\text{für Helium: } L = 0{,}0000285 \cdot \frac{760}{p} \text{ cm}$$

$$\text{für Wasserstoff: } L = 0{,}0000178 \quad \text{„}$$

Hieraus ergiebt sich das Verhältnis des Temperatursprungskoeffizienten zur mittleren Weglänge

$$\beta = \frac{\lambda}{L}$$

$$\text{für Helium: } \beta = 5{,}62$$

$$\text{für Wasserstoff: } \beta = 7{,}24^{4})$$

Für Luft fand v. Smoluchowski[3])

$$\beta = 1{,}70$$

Der Faktor β nimmt also mit zunehmendem Molekulargewicht ab und zwar scheint es, als sei der Faktor der mittleren Molekulargeschwindigkeit proportional. Dividiert man die Zahlenwerte der Molekulargeschwindigkeit durch β, so erhält man folgende Werte:

$$\text{für Luft: } \frac{447}{1{,}70} = 263$$

$$\text{für Helium: } \frac{1210}{5.62} = 216$$

$$\text{für Wasserstoff: } \frac{1694}{7{,}24} = 234,$$

also annähernd dieselben Werte.

Nach Anbringung der Temperatursprungskorrektion ergeben sich für die einzelnen Gemische folgende Koeffizienten der Leitfähigkeit.

---

[1]) H. Schultze, Ann. d. Phys **6**, 1901, S. 310.

[2]) H. Markowski, Inaug.-Diss. Halle 1904.

[3]) v. Smoluchowski, Wied. Ann. **64**, 1898, S. 129.

[4]) Der von Smoluchowski gefundene Wert $\beta = 6{,}96$ rührt daher, daß dieser Herr eine etwas größere Weglänge benutzte.

Tab. 28.

77,82 % He Gemisch 1. 22,18 % H_2

App. I.		App. II.	
p	k_0	p	k_0
69,0	0,00033051	69,0	0,00033714
—	(32688)	—	34449
64,5	33982	64,5	33720
—	34145	—	33770
54,0	34123	54,0	33900
—	34152	—	33885
42,5	34255	42,5	34205
—	34260	—	34148
27,5	34374	27,5	34089
—	34171	—	33908

Mittel:

0,0003406 0,0003398

Tab. 29.

58,75 % He Gemisch 2. 41,25 % H_2

App. I.		App. II.	
p	k_0	p	k_0
60,5	0,00034953	60,5	0,00034254
—	34410	—	33794
—	34315	—	33757
52,8	34585	52,8	34214
—	34830	—	34697
42,6	34406	42,6	33789
—	34230	—	33807
32,6	34948	32,6	33431
24,4	35484	—	34194
—	34288	24,4	34142
—	34226	—	34575
—	33841	—	34415

Mittel:

0,0003454 0,0003409

Tab. 30.

39,76 % He Gemisch 3. 60,24 % H_2

App. I.		App. II.	
p	k_0	p	k_0
85,4	0,00036334	85,4	0,00035728
—	35410	—	37354
74,4	36091	—	36181
—	35863	74,4	35781
65,0	36138	—	35814
—	35818	65,0	35770
—	36148	—	35998
—	36170	—	35958
56,0	36653	56,0	35701
—	36446	—	35683
43,1	36394	43,1	35799
—	36410	—	35758
36,3	36313	36,3	35923
—	36032		—

Mittel:

0,0003616 0,0003596

Tab. 31.

20,40 % He Gemisch 4. 79,60 % H_2

App. I.		App. II.	
p	k_0	p	k_0
82,6	0,00038137	82,6	0,00038265
—	37965	—	37962
70,8	38370	70,8	38211
—	37882	56,6	38150
56,6	38191	—	38155
—	38145	46,8	38265
46,8	38195	—	38201
—	38132	34,5	37889
34,5	38274	—	38370
—	38238		

Mittel:

0,0003815 0,0003816

Als weitere Fehlerquellen kommen in Betracht die Ableitung von Wärme durch die Elektroden und die schlechte Wärmeleitfähigkeit des Glases. Bei der Bestimmung des Einflusses dieser Fehlerquellen habe ich mich an die Angaben von W. Schwarze gehalten. Es ergab sich, daß infolge der Ableitung durch die Elektroden der Wert für k_0 für die einzelnen Gemische zu verkleinern ist, und zwar:

für App. I um: $^1/_{500}$, $^1/_{505}$, $^1/_{520}$, $^1/_{540}$,
für App. II um: $^1/_{750}$, $^1/_{755}$, $^1/_{780}$, $^1/_{800}$.

Wegen der schlechten Leitfähigkeit des Glases sind die Werte zu vergrößern um: $^1/_{280}$, $^1/_{275}$, $^1/_{270}$, $^1/_{260}$.

Nach Anbringung dieser Korrektionen erhalte ich folgende Werte für k_0, zu denen ich noch die Werte für Helium und für Wasserstoff hinzufüge, die ich den Arbeiten von Schwarze und Günther entnommen habe, und die ich noch wegen des durch den Temperatursprung bedingten Fehlers korrigiert habe.

% He	% H_2	App. I	App. II	Mittel
100,00	0,00	—	—	0,0003513
77,82	22,18	0,0003412	0,0003406	0,0003409
58,75	41,25	3460	3417	0,0003439
39,76	60,24	3623	3605	0,0003614
20,40	79,60	3823	3826	0,0003825
0,00	100,00	—	—	0,0004035

Figur 5 zeigt die schön regelmäßige Kurve, die man erhält, wenn man die Werte für k als Ordinaten, den Prozentgehalt an Wasserstoff als Abszissen eines Koordinatensystems aufträgt. Die Kurve zeigt bei etwa 27 % Wasserstoff ein Minimum.

9. Vergleichung der Ergebnisse mit der Theorie.

Nach den Untersuchungen von Alexandra Wassiljewa[1]) besteht zwischen der Leitfähigkeit eines Gemisches und der seiner Bestandteile folgende Relation:

$$k = \frac{k_1}{1 + A \cdot \frac{p_2}{p_1}} + \frac{k_2}{1 + B \cdot \frac{p_1}{p_2}},$$

in der k die Leitfähigkeit des Gemisches, k_1 und k_2 die der Einzelgase, p_1 und p_2 die Partialdrucke bedeuten. A und B sind konstante Größen für alle Mischungsverhältnisse, die nur von der Natur der Einzelgase abhängen, und zwar ist

$$A = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sigma}{s_1}\right)^2 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_2}}$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sigma}{s_2}\right)^2 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1}}$$

worin m das Molekulargewicht, s der Durchmesser eines Moleküls und $\sigma = \frac{s_1 + s_2}{2}$ ist. (Index 1 bezieht sich auf Wasserstoff, 2 auf Helium.) Bedeutet $\mathfrak{N}$ den Reibungskoeffizienten, ς die Dichte und $\bar{c}$ die mittlere Molekulargeschwindigkeit, so ist

$$\left(\frac{s_2}{s_1}\right)^2 = \frac{\mathfrak{N}_1 \cdot \varsigma_2 \cdot \bar{c}_2}{\mathfrak{N}_2 \cdot \varsigma_1 \cdot \bar{c}_1}.$$

Setzt man die sich aus diesen Beziehungen ergebenden Größen

$$A_1 = 0{,}6962, \quad B_1 = 1{,}5616$$

in die Formel für k ein, so erhält man stets zu große Werte, die bis zu 8 % von den beobachteten abweichen.

Die Theorie bietet nun eine andere Möglichkeit zur Berechnung der Leitfähigkeit der Gemische. Behält man die Beziehung

$$A = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \cdot \frac{\mathfrak{N}_1 \cdot \varsigma_2 \cdot \bar{c}_2}{\mathfrak{N}_2 \cdot \varsigma_1 \cdot \bar{c}_1} \cdot B$$

$$\text{oder: } A = \frac{\mathfrak{N}_1}{\mathfrak{N}_2} \cdot B$$

[1]) A. Wassiljewa, Phys. Zeitsch. **5**, 1904, 737.

bei und berechnet hiermit aus den Beobachtungen die Größen A und B aus, so erhält man folgende Werte

Gemisch	B
1	1,7511
2	1,7958
3	1,7886
4	1,7846

Mittel: $B_2 = 1{,}7846$

und daraus: $A_2 = 0{,}7933$.

Setzt man diese Mittelwerte rückwärts in die Formel für k ein, so erhält man für die einzelnen Gemische folgende Koeffizienten der Leitfähigkeit, denen ich die beobachteten gegenüberstelle.

% H_2	% He	$k_0 \cdot 10^7$		Abweichung in %
		berechnet	beobachtet	
0,00	100,00	3513	3513	0,00
22,18	77,82	3397	3409	— 0,35
41,25	58,75	3456	3439	+ 0,49
60,24	39,76	3607	3614	— 0,19
79,60	20,40	3795	3825	— 0,79
100,00	0,00	4035	4035	0,00

Wie die Tabelle zeigt, ist die Übereinstimmung der berechneten Werte mit den beobachteten eine recht gute.

Es zeigt sich auch hier, wie bei den Gemischen zwischen Wasserstoff und Sauerstoff[1]) und zwischen Argon und Helium[2]), daß die Formel für k als Interpolationsformel brauchbar ist, daß dagegen die theoretisch abgeleiteten Formeln für die Größen A und B als unzutreffend zu bezeichnen sind. Gute Übereinstimmungen mit den Beobachtungen wurden bei Gemischen

[1]) A. Wassiljewa, Phys. Zeitschr. **5**, 1904, 737.

[2]) J. Wachsmuth, Inaug.-Diss. Halle 1908.

zwischen Wasserstoff und Sauerstoff und zwischen Wasserstoff und Helium erzielt, wenn man unter Beibehaltung der Beziehung

$$A = \frac{\Re_1}{\Re_2} \cdot B$$

die Konstanten A und B aus den Beobachtungen berechnete. Dagegen zeigen Argon-Heliumgemische auch in diesem Falle Abweichungen bis zu 11 %.

Zum Schlusse sei es mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, dem Geh. Reg.-Rat Herrn Prof. Dr. E. Dorn für die freundliche Anregung zu dieser Arbeit und die liebenswürdige Unterstützung bei ihrer Ausführung meinen ergebensten Dank auszusprechen.

Lebenslauf.

Ich, Walter Arnold, evangelischer Konfession wurde am 20. Mai 1889 in Alt-Salze, Kreis Kalbe, als Sohn des † Kaufmanns Heinrich Arnold und dessen Ehefrau Minna, geb. Gummert geboren. Von Ostern 1895 bis Ostern 1899 besuchte ich die Bürgerschule zu Gr. Salze und darauf bis Ostern 1905 die Realschule zu Schönebeck. Meine weitere Schulbildung erhielt ich an der Oberrealschule zu Magdeburg, die ich Ostern 1908 mit dem Reifezeugnis verließ, um mich dem Studium der Naturwissenschaften zu widmen. Meine gesamte bisherige Studienzeit brachte ich auf der Universität Halle-Wittenberg zu. Hier besuchte ich die Vorlesungen folgender Professoren und Dozenten:

Bauch, Boeke, Cantor, Dorn, †Ebbinghaus, Eberhard, Fries, Gutzmer, †Luedecke, Menzer, Schmidt, Uphues, Vorländer, Walther, Wangerin.

Allen diesen Herren möchte ich an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank aussprechen.

Fig. 1.

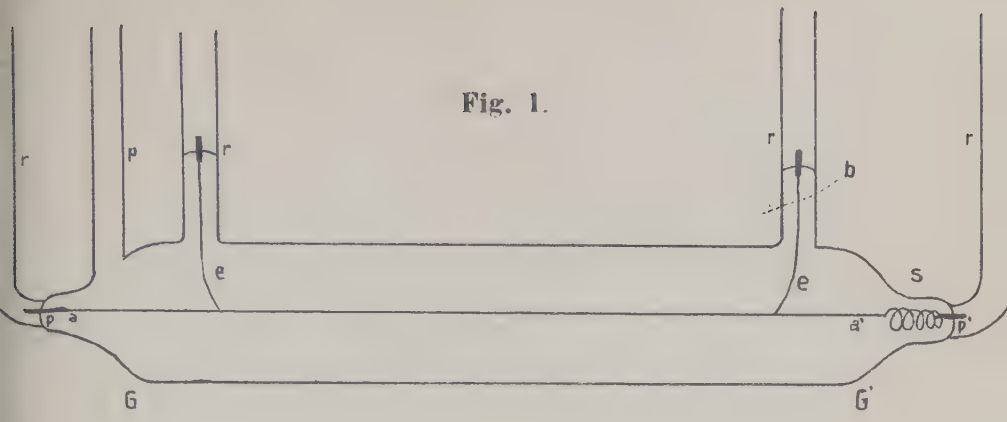
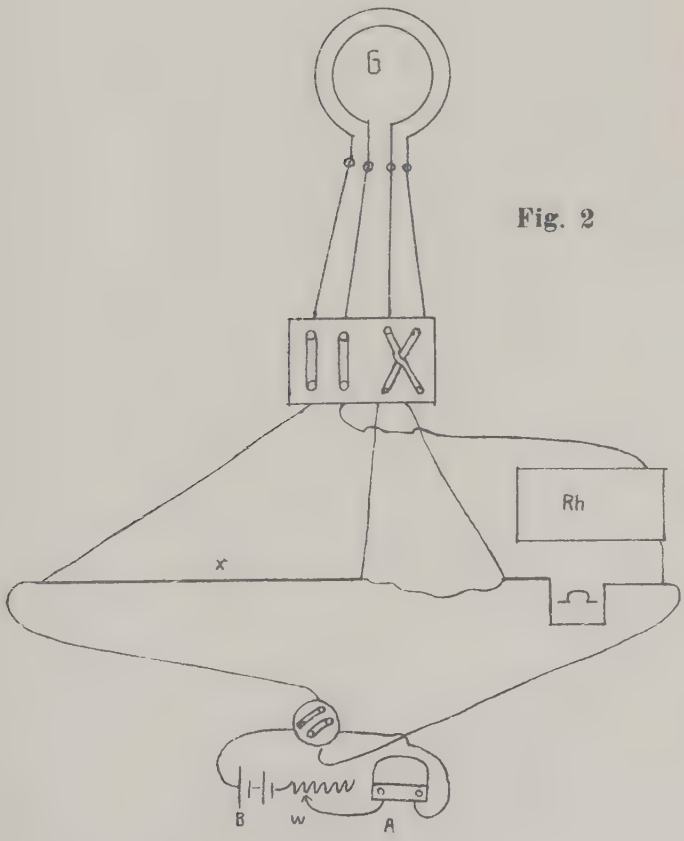


Fig. 2



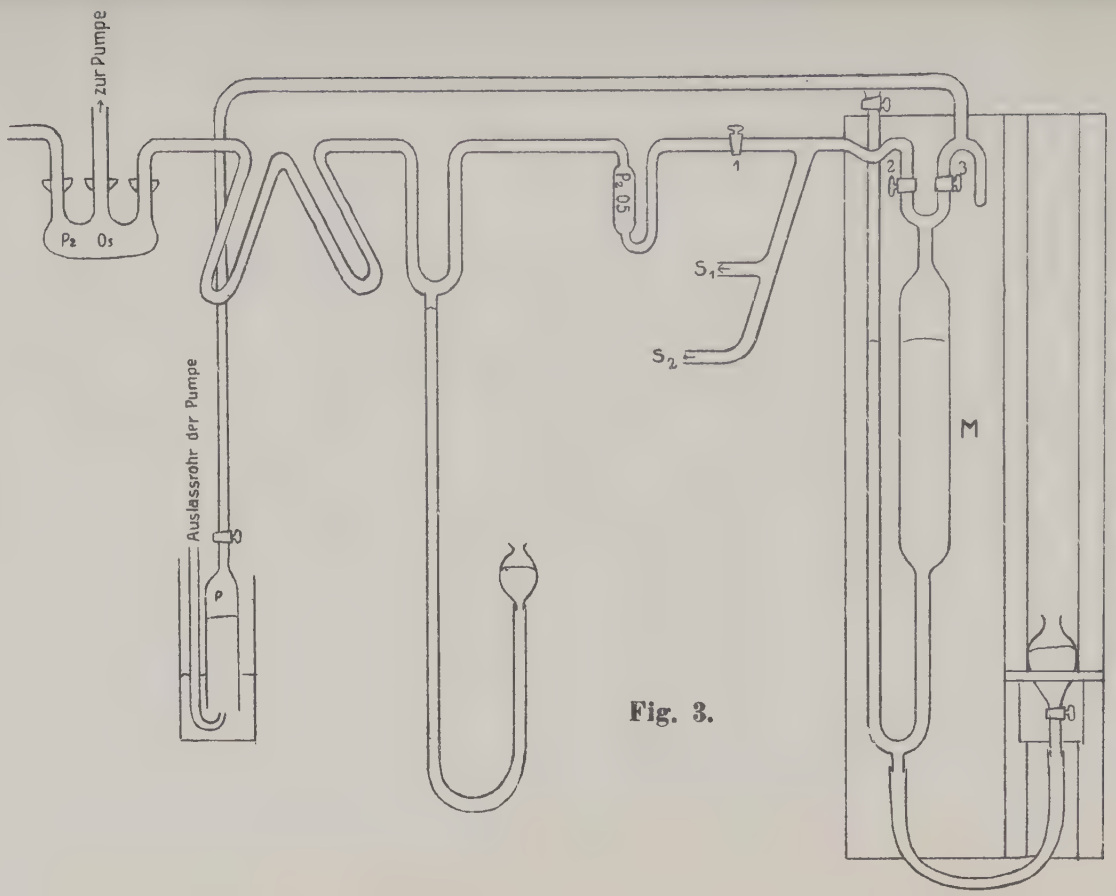


Fig. 3.

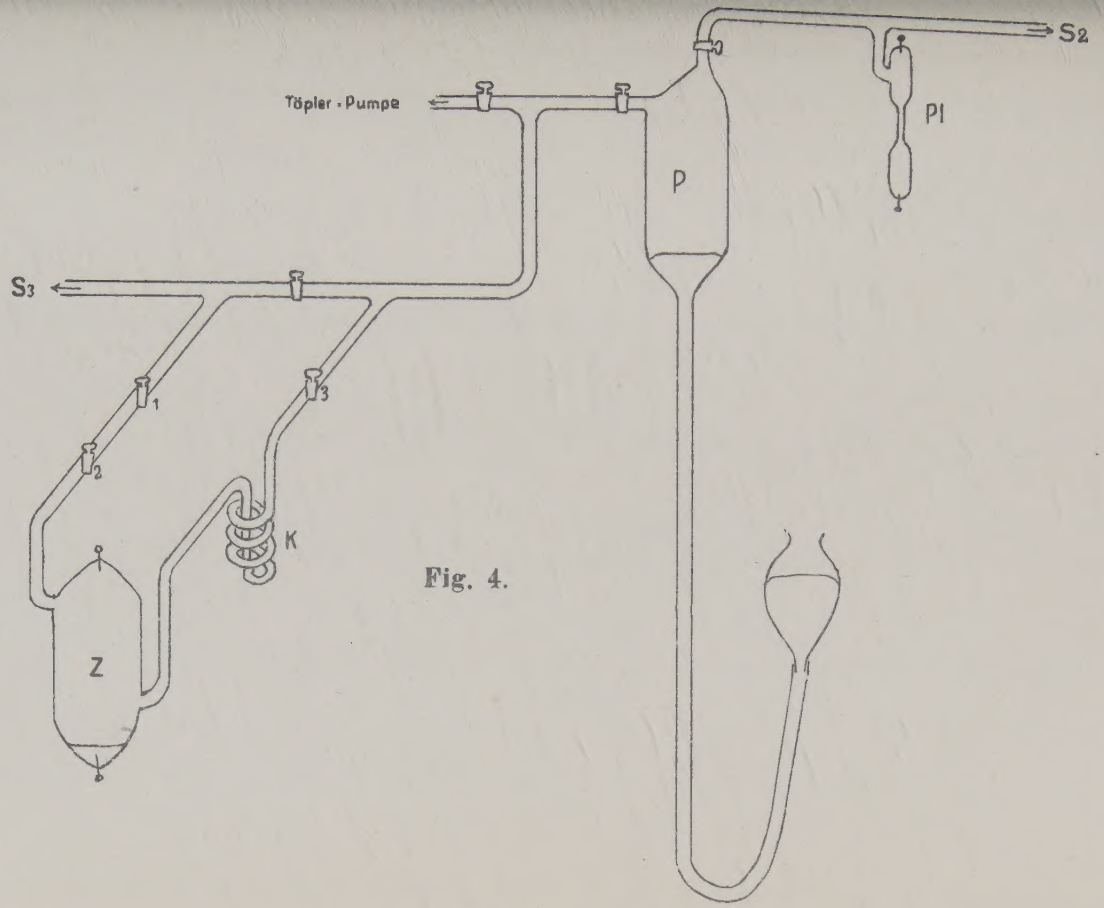


Fig. 4.

Wärmeleitungskoeffizient von Gemischen zwischen Wasserstoff und Helium.

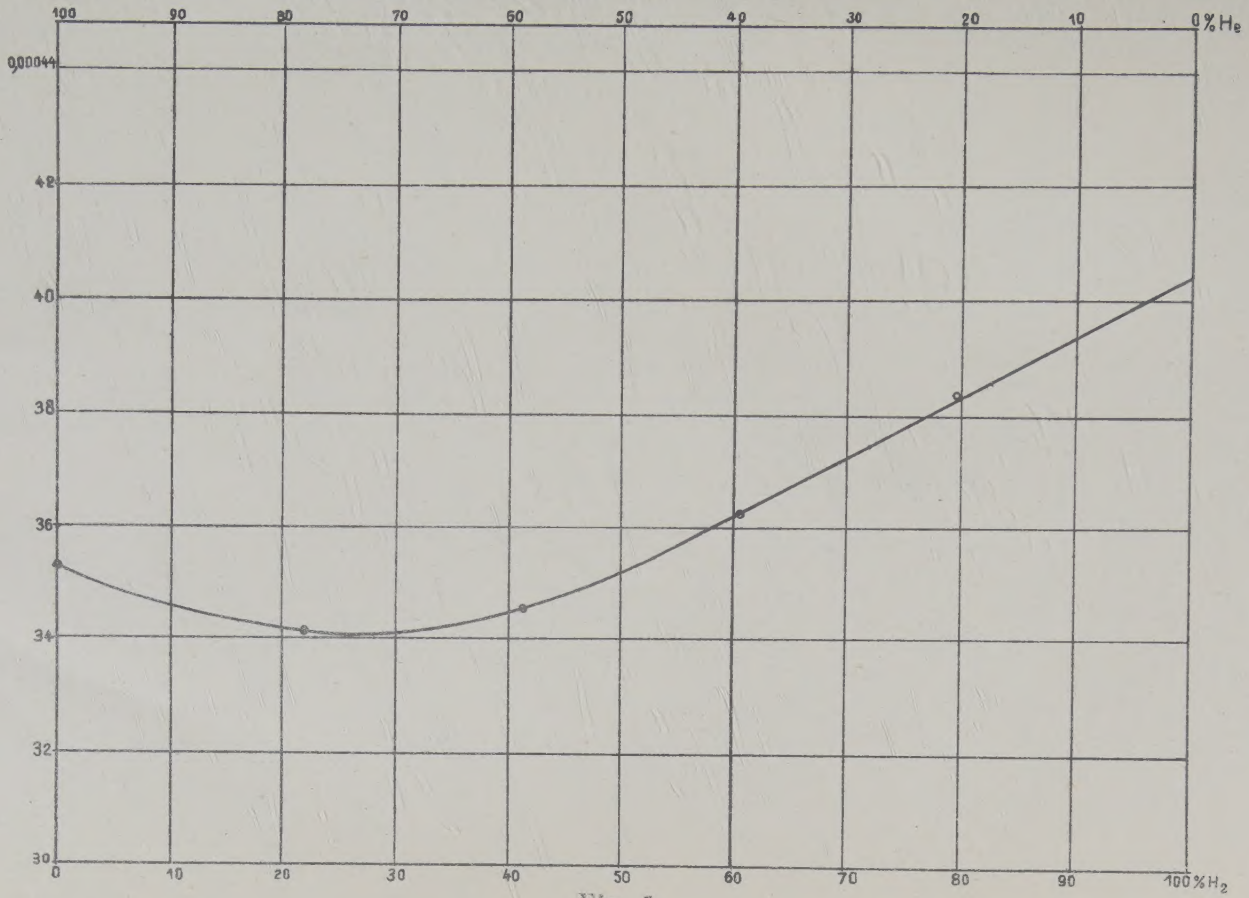


Fig. 5.